



Marika Vänntilä

PULSSIOKSIMETRIN ELEKTRONIIKKA

PULSSIOKSIMETRIN ELEKTRONIIKKA

Marika Vänntilä
Opinnäytetyö
Syksy 2013
Hyvinvointiteknologian koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Koulutusohjelma, suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Marika Vänntilä

Opinnäytetyön nimi: Pulssioksimetrin elektroniikka

Työn ohjaaja: Jukka Jauhiainen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2013

Sivumäärä: 48 + 1 liite

Painettava elektroniikka tarjoaa uudenlaisia mahdollisuuksia erityisesti kerta-käyttöisten terveydenhuollon laitteiden valmistukseen. Hybridivalmistuksessa voidaan useamman valmistustekniikan edut yhdistää yhteen tuotteeseen. Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia, voiko painettavaa elektroniikkaa käyttää tasomaiselta pinnalta mittaavan pulssioksimetrin elektroniikan korvaajana, etsiä kompromissiratkaisuja hybridivalmistuksesta ja todentaa selvitystyön tuloksia käytännössä. Opinnäytetyön tilaajana on Spektikor Oy, joka on kertakäyttöisiin terveydenhuollon laitteisiin keskittynyt yritys.

Opinnäytetyössä perehdyttiin happisaturaation fysiologiseen taustaan ja mittaustekniikkaan. Kirjastosta ja internetistä löytyneen aineiston pohjalta saatiin kokonaiskäsitys happisaturaation mittaamisen haasteista. VTT:llä käytiin tutustumassa hybridivalmistukseen. Kurssimateriaalit olivat tärkeimpänä lähteenä painettavan elektroniikan osiossa. Lisäksi alan asiantuntijoilta saatiin täsmällisiä vastauksia epäselviin kohtiin.

Painettavaa elektroniikkaa ja hybridivalmistusta käsiteltiin nimenomaan pulssioksimetrin elektroniikan osalta. Niiden soveltuvuutta pulssioksimetriin todennettiin prototyypillä, jossa joustavalle kalvolle tulostettuun johdinkuvioon lisättiin pulssioksimetrin elektroniikkaa. Prototyypissä hyödynnettiin aiemman Oamk:n ja Spektikor Oy:n välisen projektin prototyypin kytkentää. Kytkentä osoittautui kuitenkin keskeneräiseksi happisaturaation määrittämiseen. Tämä vaikutti myös opinnäytetyön sisältöön.

Painopiste painettavasta elektroniikasta siirtyi osin mittaustekniikan kehittämiseen. Mittaustekniikan kehittämistä varten rakennettiin toinen prototyyppi perinteiselle piirilevyille. Prototyyppi toi lupaavia tuloksia. Opinnäytetyön lopussa pohdittiin jatkokehitystä painettavan elektroniikan, hybridivalmistuksen ja prototyypin näkökulmasta.

Asiasanat: Happisaturaatio, hybridivalmistus, painettava elektroniikka, pulssioksimetri

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
SISÄLLYS	4
ALKULAUSE	6
1 JOHDANTO	7
2 FYSIOLOGINEN TAUSTA	9
2.1 Happisaturaatio	9
2.2 Hemoglobiinin hapensitomiskyky	10
3 MITTAUSTEKNIikka	12
3.1 Happisaturaatiomittarin toimintaperiaate	12
3.2 Absorptiotekijät	13
3.3 Absorptiot eri aallonpituuksilla	14
3.4 Mittalaitteet	15
3.4.1 Pulssioksimetrit	15
3.4.2 NIRS-laitteet	16
4 PAINETTAVA ELEKTRONIIKKA JA HYBRIDIVALMISTUS	20
4.1 Painettava elektroniikka	20
4.1.1 Valmistusprosessi	22
4.1.2 Haasteet	25
4.1.3 Soveltuvuus happisaturaatiomittariin	25
4.2 Painetut hybridisysteemit	26
4.2.1 Ladonta ja liimaus	27
4.2.2 Ylivalu	28
5 PROTOTYYPPI	30
5.1 Painettavaa elektroniikkaa sisältävä prototyyppi	30
5.1.1 Kytkenän suunnittelu	30
5.1.2 Layoutin piirtäminen	32
5.1.3 Komponenttien liimaus	33
5.1.4 Testausta ja tuloksia	34
5.2 Prototyyppi mittaustekniikan kehittämiseen	35
5.2.1 Piirilevyn valmistus	35

5.2.2 Säättömahdollisuudet	36
5.2.3 Testaus ja tulokset	37
6 JATKOKEHITYS	39
6.1 Painettava elektroniikka ja hybrdivalmistus	39
6.2 KytKentä	39
6.3 Häiriöiden poisto	40
6.4 Optimaalinen mittauspiste	40
6.5 Happisaturaation määrittäminen	41
7 POHDINTA	43
LÄHTEET	46

ALKULAUSE

Kiitän opinnäytetyön tilaajaa Kari Kivistöä mielenkiintoisesta opinnäytetyöstä. Haluan kiittää kaikkia niitä, jotka ovat edesauttaneet opinnäytetyön edistymistä. Erityinen kiitos opinnäytetyön ohjauksesta Jukka Jauhiaiselle ja kielenhuollosta Pirjo Partaselle. Kiitokset myös laboratorioinsinööreille Henry Hinkulalle ja Timo Matalalammelle sekä PrinLabin henkilökunnasta Harri Määtälle ja Tomi Tuomalalle.

Oulussa 5.9.2013

Marika Vänntilä

1 JOHDANTO

Happisaturaatio eli happikyllästeisyys on eräs yleisimmistä muuttujista ihmisen terveydentilan arvioinnissa ja ennakkoinnissa. Pulssioksimetri on laite, jolla valtimoveren happisaturaatiota mitataan ihon pinnalta kahden eri valon aallonpituuden avulla. Happisaturaatiolukema kertoo, kuinka suuri osa veren punasolun hemoglobiinista on sitonut happimolekyylin. Happisaturaatio mitataan useimmiten läpimenneen valon määrästä perifeeriseltä alueelta, kuten sormenpäästä tai korvaledestä.

Perifeeristen alueiden verenkierto on herkkä ympäristön vaikutuksille. Pulssioksimetri voi näyttää virheellistä lukemaa jopa kylmästä sormesta (1). Koska pulssioksimetrit kalibroidaan valtimoveren(SaO_2) suhteen, esimerkiksi kylmyys ei vääristä isojen valtimoiden happisaturaatiota. Opinnäytetyössä tutkitaan happisaturaation mittausta kaulavaltimosta. Jos mittauksen luotettavuus parantuu ympäristöoloista riippumattomaksi, pulssioksimetrin käyttöympäristö voisi levitä laajemminkin ensiapuun ja ehkäpä jopa vuoristoon.

Opinnäytetyön tavoitteina oli selvittää painettavan elektroniikan ja hybridivalmistuksen soveltuvuutta kaulavaltimosta mittaavan pulssioksimetrin elektroniikan korvaamisessa ja todentaa tuloksia käytännössä. Opinnäytetyö tehtiin Spektikor Oy:lle, joka on oululainen kertakäyttöisiin terveydenhuollonlaitteisiin keskittynyt yritys. Painettava elektroniikka ja hybridivalmistus tarjoavat uudenlaisia mahdollisuuksia innovatiiviseen suunnitteluun ja kustannustehokkaaseen valmistukseen.

Kustannuskysymykset nousevat terveydenhuollon hankinnoissa entistä tärkeämmäksi taloudellisen taantuman vuoksi. Opinnäytetyön aiheessa on kustannusnäkökulma siten, että työssä selvitetään myös painettavan elektroniikan ja hybridivalmistuksen soveltuvuutta pulssioksimetrin elektroniikan toteutuksessa. Painettava elektroniikka tarjoaa todella paljon uusia mahdollisuuksia nimenomaan kertakäyttöisen elektroniikan valmistukseen kustannustehokkaan rullalla -valmistuksen ansioista.

Painettavan elektroniikan ominaisuudet eroavat perinteisestä piipohjaisesta elektroniikasta. Joustavuus, keveys, ohuus ja lyhyt elinikä ovat painetun tuotteen ominaispiirteitä (2). Lisäksi painettava elektroniikka vaatii suuremman pinta-alan kuin piipohjainen elektroniikka (2) Nämä piipohjaisesta elektroniikasta poikkeavat ominaisuudet mahdollistavat innovatiivisen ja samalla kustannustehokkaan ratkaisun tuotteiden valmistukseen. Erilaisuus ja edullisuus ovat hyvät kilpailuvaltit markkinoilla.

Kuitenkaan kaikkia elektroniikan komponentteja ei voida ainakaan vielä valmistaa painamalla. Näissä sovelluksissa potentiaalisesti valmistustavaksi nousee hybrdivalmistus, jossa painettavaa ja piipohjaista elektroniikkaa voidaan käyttää rinnan. Hybrdivalmistus on usean eri valmistustavan yhdistelmä, jossa valmistusprosessi suunnitellaan tuotteen suorituskyvyn ja hinnan optimoimiseksi (3). Sekä kertakäyttöisissä että jatkuvaan käyttöön tarkoitetuissa terveydenhuollon laitteissa turvallisuus, luotettavuus ja hygieenisuus ovat tärkeissä roolissa jo lainsäädännönkin vuoksi. Yhdistämällä usean eri valmistustekniikan edut yhteen tuotteeseen voidaan vastata parhaiten laadukkaan tuotteen kriteereihin.

Opinnäytetyö, jossa pulssioksimetrin kehittämiseen yhdistetään painettavaa elektroniikkaa, vaatii aiheena monialaista osaamista: terveystekniikkaa, elektroniikkaa ja jonkin verran ohjelmointitaitoaakin. Niihin hyvinvointiteknologian koulutusohjelma antaa hyvin valmiuksia. Opinnäytetyön aihe on todella mielenkiintoinen ja painottuu opinnäytteen tekijän opintojen suuntautumisten mukaisesti.

2 FYSIOLOGINEN TAUSTA

Pulssioksimetrin kehittäminen vaatii ihmisen fysiologian ymmärtämistä. Tässä luvussa selitetään, mitä tarkoittaa happisaturaatio ja mitkä tekijät vaikuttavat hapen kiertokulkuun kehossa. Sairaus tai jopa ympäristön olosuhteet voivat olla estämässä normaalia hapen kulkua kehossa. Laitteen toimintavarmuus erilaisissa tilanteissa ja ympäristöissä on osa luotettavuutta. Fysiologisen taustan ymmärtäminen on tärkeää luotettavan pulssioksimetrin kehittämisessä.

2.1 Happisaturaatio

Happisaturaatio (SO_2) kertoo veren happikylläisyydestä eli siitä kuinka paljon soluilla on happea saatavilla. Hemoglobiini ($C_{2932}H_{4724}N_{828}S_8Fe_4O_{848}$) on rautapitoinen punasolun osa, jonka tehtävä on kuljettaa happea soluille(4). Keuhkoissa hemoglobiini sitoo itseensä happea ja hapettunut hemoglobiini kulkee valtimoita pitkin hiussuoniin, jossa hemoglobiini luovuttaa hapen soluille. Happisaturaatio määritetään hapettoman ja hapellisen hemoglobiinin suhteesta. Happisaturaation arvo kertoo hapen riittävydestä. Seuraamalla happisaturatiota pystytään ennakoimaan potilaan terveydentilaa muutoksia ja arvioimaan hoidon tarvetta (1). Liian vähäinen happi voi aiheuttaa kudolvaurioita tai jopa kuoleman (5). Valtimoveren happikylläisyys (SO_2) on normaalisti noin 97 % ja lepotilassa laskimoveren happikylläisyys(SvO_2) noin 75 % (5).

Valtimoveren happisaturaation riippuvuus oksi- ja deoksihemoglobiinista näkyy kaavassa 1 (6, s. 170).

$$SO_2 = (HbO_2)/(Hb+HbO_2)$$

KAAVA 1

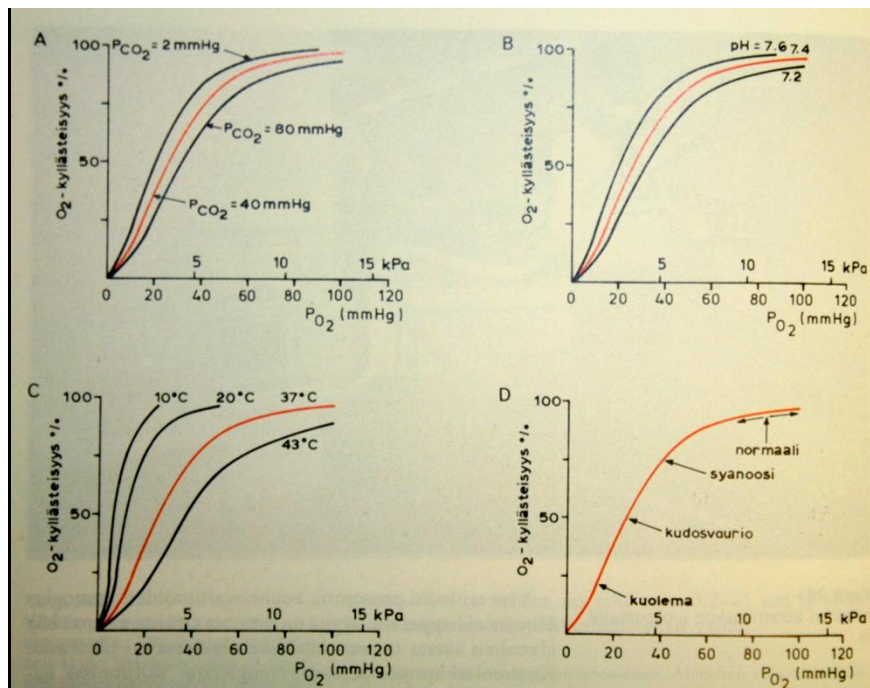
SO_2 = veren happisaturaatio

HbO_2 = oksihemoglobiini

Hb = deoksihemoglobiini

2.2 Hemoglobiinin hapensitomiskyky

Hemoglobiini tarvitsee otolliset olosuhteet sitoakseen hapen keuhkoissa ja luovuttaakseen hapen soluille. Hapensitomiskyky kuvaa hapen sitomis- ja luovutamisherkkyyttä. Hapensitomiskyky vaikuttaa siihen, kuinka paljon hemoglobiini voi sitoa happea keuhkoissa itseensä ja kuinka herkästi luovuttaa happea soluille hiussuonissa. Kun happikylläisyyteen vaikuttavat tekijät, lämpötila, pH-arvo ja hiilidioksidiasapaine muuttuvat, muuttuu hemoglobiinin hapensitomiskyky sen mukaan (5, s. 282). Olosuhteet voivat siis edesauttaa tai estää hapen sitoutumista ja luovutusta. Kuvassa 1 on happikyllästeisyyskäyrät happiasapaineen funktiona.



KUVA 1. Oksihemoglobiinin (HbO_2) dissosiaatiokäyrä (5, s. 282)

Hapenkulutuksen kasvaessa hiussuonissa hemoglobiini luovuttaa runsaasti happea ja happikyllästyneisyyden arvo laskee jyrkästi. Esimerkiksi urheiltaessa hiilidioksidiasapaine kudoksessa kasvaa, pH-arvo laskee hiilihapon ja maitohapon seurauksena ja lisäksi lämpötila kohoaa (kuvassa 1 käyrät siirtyvät oikealle). Samaan aikaan keuhkoissa tapahtuu vastakkainen reaktio, kuvan 1 käyrät

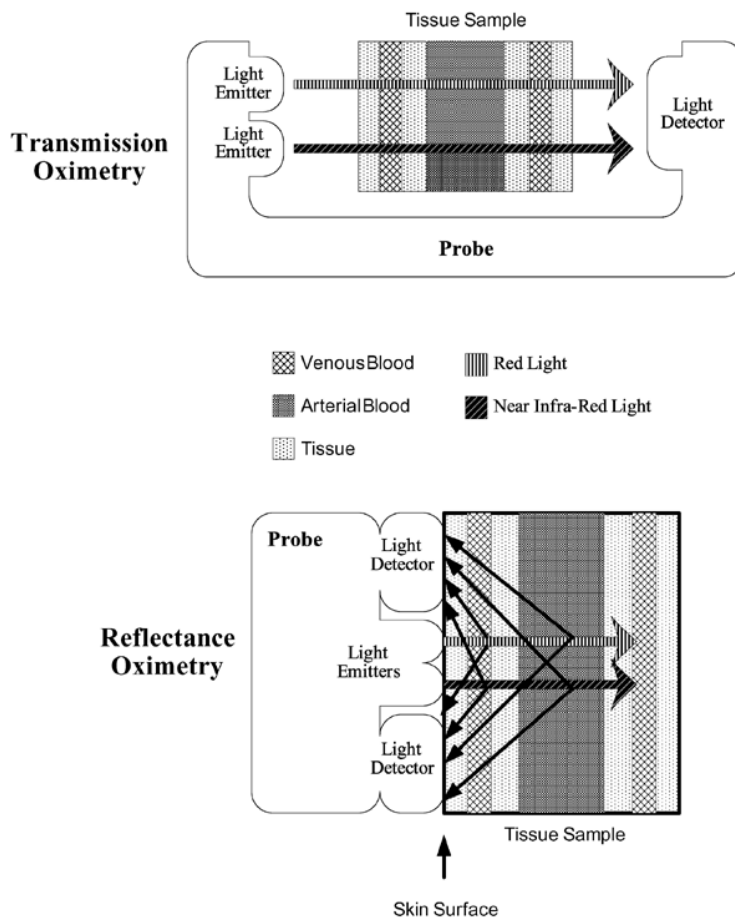
siirtyvät vasemmalle, joten hemoglobiinin hapensitomiskyky lisääntyy. Tässä tilanteessa sama verimäärä luovuttaa enemmän happea kudokselle, jotta happikyllästeisyys pysyisi samassa lukemassa kuin lepotilanteessa. Raskaan työn tekijän hapensitomiskyky kudoksissa saattaa jopa kolminkertaistua samalle verimäärälle. (5.) Hapenkulutuksen kasvu samalle verimäärälle näkyy laskimoveren happikyllästeisyyden pienenemisessä.

3 MITTAUSTEKNIikka

3.1 Hapissaturaatiomittarin toimintaperiaate

Noninvasiivinen hapissaturaation mittaaminen perustuu valon absorptioon. Sensorilla vastaanotetaan joko kohteen läpäisseen tai kohteesta heijastuneen valon määrää. Mittauksessa käytetään kahta eri valon aallonpituutta, yleensä punaista valoa (660 nm) ja infrapuna-valoa (940 nm), jotka ohjataan mittaushohteen. Hapellinen hemoglobiini ja hapeton hemoglobiini absorboivat eri tavalla valoa. Osa valosta absorboituu, mikä pienentää vastaanotetun valon intensiteettiä. Aallonpituuksien absorptioiden suhteesta lasketaan hapissaturaatio. (1, s. 17.)

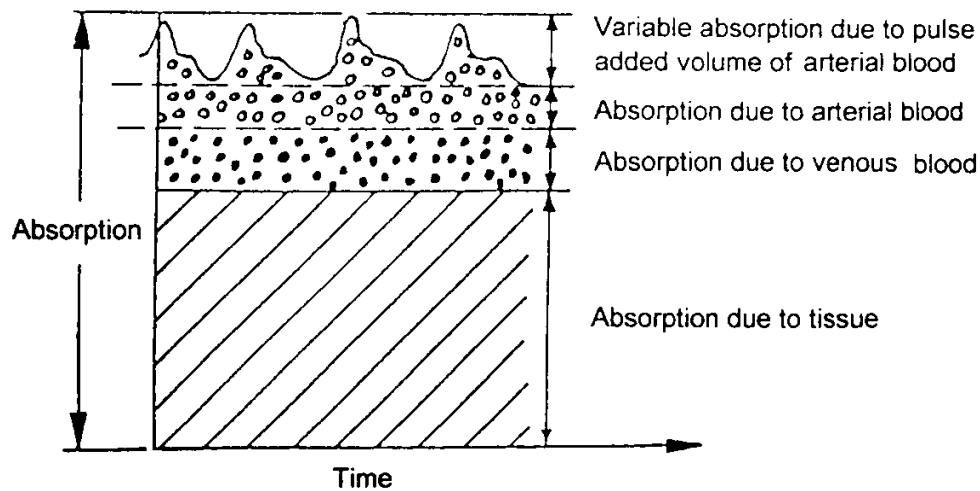
Kuvassa 2 näkyvät mittausmenetelmien erot. Ylemmässä kuvassa hapissaturaatio lasketaan läpimenneen valon intensiteetistä (perinteinen pulssioksimetri) ja alemmassa heijastuneen valon intensiteetistä. Sormenpääpulssoximetrissä mitataan sormen läpi mennyttä valoa. Lihas- ja aivokudoksen hapissaturaation mittauksessa mitataan heijastunutta valoa.



KUVA 2. Perinteisen pulssioksimetrin ja heijastuvaa valoa mittaavan pulssioksimetrin toimintaperiaatteet (7)

3.2 Absorptiotekijät

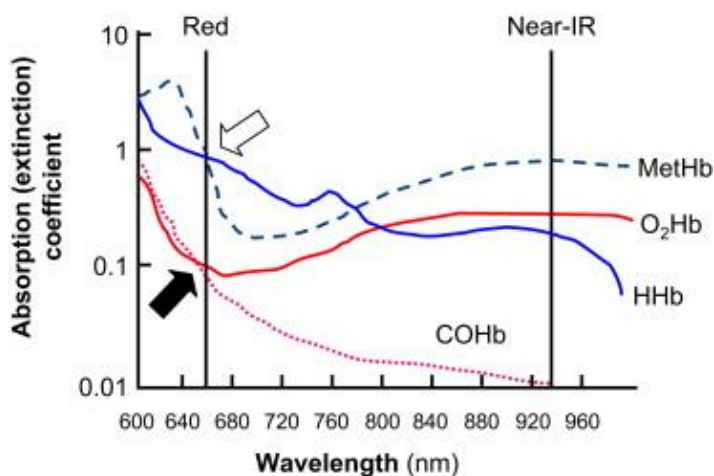
Kuvassa 3 näkyvät kudoksen absorptiotekijät ajan suhteen. Kuvasta nähdään lihaskudoksen ja laskimon absorptioiden olevan vakiona ajan suhteen. Valtimon absorptio vaihtelee sykkeen tahdissa, mutta myös valtimoveressä on huomattavissa pieni sykkeestä riippumaton vakioabsorptio. Pulssioksimetri laskee veren happisaturaation pulsaatiosta, toisin kuin NIRS-monitoroinnissa, jossa kudoksen happisaturaatio lasketaan koko kudosalueelta (8).



KUVA 3. Absorptioon vaikuttavien tekijöiden osuus ajan suhteen (6, s. 205)

3.3 Absorptiot eri aallonpituuksilla

HbO₂ ja Hb:n absorptiokäyrien leikkauspistettä 810 nm kutsutaan isobestiseksi pisteeksi. Teoreettinen kudoksen kokonaishemoglobiinin konsentraatio voidaan laskea hyödyntämällä isobestistä pistettä laskuissa (8). Kuvassa 4 näkyvät hemoglobiinin absorptiokäyrät. Punainen käyrä kuvassa on hapellinen hemoglobiini, jota kutsutaan myös oksihemoglobiiniksi (O₂Hb), sininen käyrä on hapeton hemoglobiini eli vastaavasti deoksihemoglobiini (HHb). Hemoglobiini, johon on sitoutuneena häkää, merkitään COHb. Tupakoitsijoilla on kokoajan jonkin ver-
ran häkää veressä.



KUVA 4. Hemoglobiinin absorptiokäyrä eri aallonpituuksille (9)

Methemoglobiinissa (MetHb) rauta on kolmiarvoinen (Fe^{+3}), jolloin hemoglobiini ei osallistu hapenkuljetukseen. MetHb-pitoisuuksiin vaikuttavat nitriitti ja kloriitti. Normaali tilanteessa MetHb:ta on pieniä määriä veressä. Sekä COHb ja MetHb estävät hapen sitoutumisen hemoglobiiniin ja siten haittaavat korkeina pitoisuuksina hapenkuljetusta soluille ja voivat aiheuttaa elimistön myrkytystilaan. (10). Hapenpitoisuudella hemoglobiiniin hapen tilalle sitoutuneet aineet voivat aiheuttaa virhettä mittaustulokseen (kuva 4), sillä valon absorboituminen on esimerkiksi 660 nm:n kohdalla HHb:n ja COHb:n pitoisuuksien absorptioiden yhteisvaikutusta.

3.4 Mittalaitteet

Opinnäytetyön yhteydessä löytyi tietoa perifeerisen alueen pulssioksimetreistä ja laitteista, joissa aivo- tai lihaskudoksen paikallinen happisaturaatio mitattiin heijastuneen valon avulla (NIRS-laitteet). Opinnäytetyössä tutkittava happisaturaatiomittari on näiden kahden yhdistelmä. Laskenta perustuu pulsaatioon, mutta mittausta tehdään heijastuneen valon avulla. Tiedonhaussa tuli esille termit pulssioksimetria ja NIRS-teknologia. Teknologiat pidettiin toisistaan erillisinä, vaikka myös pulssioksimetreissä toinen aallonpituus on infrapuna-alueella. Ilmeisesti termit juontavat juurensa laitteiden toisistaan eroavista mittaustavoista.

3.4.1 Pulssioksimetrit

Pulssioksimetrissä happisaturaatio määritetään verenvirtauksen pulsaatiosta 660 nm:n ja 940 nm:n aallonpituuksien absorptioiden suhteesta (1 s.17). Kuvat 3 ja 4 havainnollistavat laskennan perusteita. Kuvasta 3 nähdään, miksi mittausta perustuu pulsaatioon. Vain valtimon absorptio muuttuu ajan suhteen, joten valtimoveri erottuu muista absorptiotekijöistä sen perusteella. Pulssioksimetrit huomioivat vain valtimon pulsaation, jolloin laskimoiden ja kapillaariverenkierron vaikutukset mittaustuloksessa saadaan minimiin (1 s.17).

Kuvasta 4 nähdään happisaturaation muutoksien vaikutukset hemoglobiinin absorptiospektriin. Terveen ihmisen veren hemoglobiinin absorptiospektri on likimain punaisen käyrän muotoinen. Happisaturaation laskiessa käyrän muoto

alkaa lähestyä sinisen käyrän muotoa, jolloin myös absorptiot 660 nm:n ja 940 nm:n kohdalla muuttuvat. Kuvasta 4 voidaan päätellä 660 nm:n aallonpituuden reagoivan herkemmin hapettoman hemoglobiinin määrään ja 940 nm:n aallonpituuden reagoivan herkemmin hapen sitoneen hemoglobiinin määrään. Mittauksessa tarvitaan kaksi aallonpituutta, koska mittalaitteen signaalin voimakkuuteen vaikuttaa etäisyys valtimosta.

Perifeerisen alueen pulssioksimetrit mittaavat happisaturaatiota (SpO_2) sormen, korvan tai varpaan lävitse. Kuvassa 5 on sormenpääpulssioksimetri. Ääreisverenkierron kudosperfuusio, kylmyys, kynsilakka, pigmentoitunut iho, lika, ja liike voivat aiheuttaa pulssioksimetriin todellista matalamman happisaturaatioarvon (1 s.18; 11).

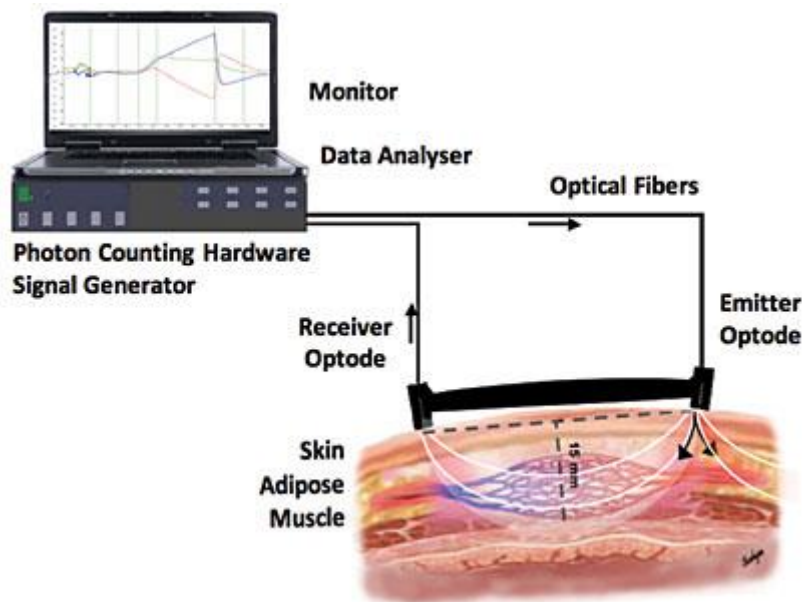


KUVA 5. Meditechin valmistama sormenpääpulssioksimetri

3.4.2 NIRS-laitteet

Kudoksen happisaturaatiota voidaan mitata paikallisesti lähi-infrapunaspektroskopiaa hyödyntävillä laitteilla, NIRS-laitteilla. NIRS-laitteet soveltuvat siis moneen muuhunkin tarkoitukseen kuin happisaturaation mittaamiseen, mutta tässä opinnäytetyössä on käsitelty asiaa siitä näkökulmasta, että

NIRS-laitteiden tekniset piirteet olisivat helposti hyödynnettävissä happisaturaatiomittarin toteutuksessa. NIRS-laitteen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 6.



KUVA 6. NIRS-monitoroinnin toimintaperiaate (12)

NIRS-laitteissa happisaturaation määrittäminen perustuu myös hemoglobiinin absorptioihin eri aallonpituuksilla. Erona pulssioksimetrin toimintaperiaatteeseen NIRS-laitteen mittausta on jatkuvaa ja kohdentuu koko kudosalueelle. Mittausalueella on siis sekä valtimoita, laskimoita ja etä kapillaarivertaa (4). NIRS-monitoreita on nykyään käytössä esimerkiksi leikkauksien aikana, jolloin aivojen hapetustilaa seurataan noninvasiivisesti. Aivokudoksen happeutumisen seuranta on tärkeää, sillä liian alhainen happisaturaatio aivokudoksessa (rSO_2) voi aiheuttaa pysyviä aivovaurioita. Kuvassa 7 on esimerkki monitorointiin tarkoitetusta NIRS-laitteesta.



KUVA 7. NIRS-monitori (13)

Valolähde (laser tai led) ja valoa vastaanottava sensori ovat samassa anturissa. Komponentit sijoitetaan anturiin niin, että valolähteen ja detektorin etäisyys on esimerkiksi 4 cm. Lisäksi anturiin laitetaan toinen detektori lähemmäksi valolähdettä, esimerkiksi 3 cm. Valo kulkee ellipsin muotoisen radan ja palaa lähtöpisteeseen. Tietyn matkan päässä olevalla sensorilla (yhellä tai usealla) vastaanotetaan kudoksesta palaavaa valoa. Detektorien ulostulot vähennetään keskenään, jolloin saadaan lopputuloksena aivokudoksen happisaturaatio tietyltä syvyydeltä, josta lähempänä olevan kudoksen vaikutus on ”suodatettu”. (8.)

Kuvassa 8 on esimerkki PortLite-laitteen anturista, jolla voidaan mitata paikallisesti kudoksen hapettoman ja hapellisen hemoglobiinin pitoisuuksia sekä veren kokonaishemoglobiinikonsentraatiota. PortLite-laitetta voidaan käyttää esimerkiksi aivojen happeutumisen seurannassa, urheilutieteessä ja toiminnallisuuksien tutkimisessa (14).

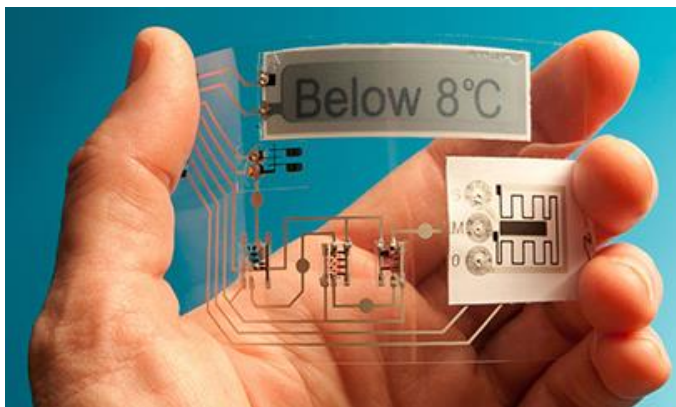


KUVA 8. PortLite-laitteen anturi (15)

4 PAINETTAVA ELEKTRONIIKKA JA HYBRIDIVALMISTUS

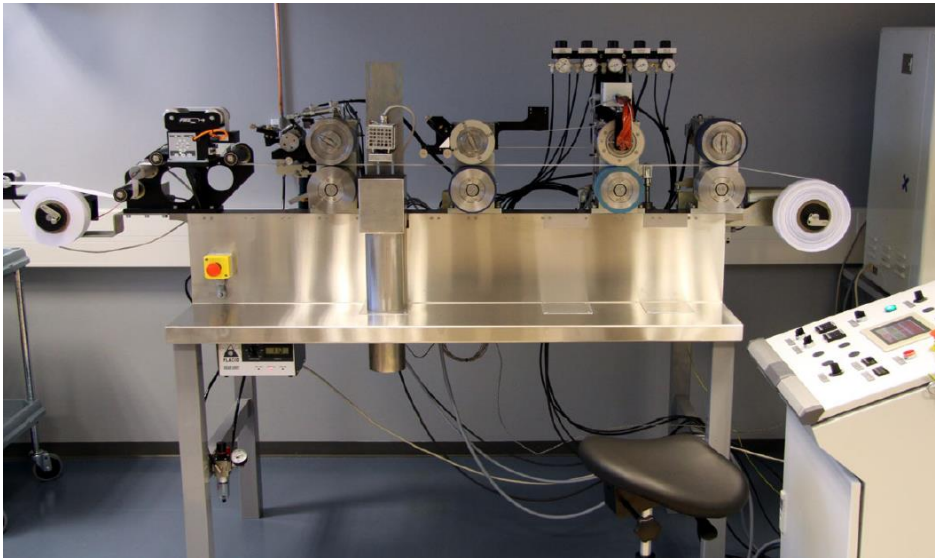
4.1 Painettava elektroniikka

Painettavassa elektroniikassa virtapiirit komponentteineen valmistetaan ainoastaan painotekniikoita käyttäen (3). Painamalla tehtyjen tuotteiden ominaisuuksia ovat joustavuus, keveys, ohuus ja edullisuus (2). Verrattuna piipohjaiseen komponenttivalmistukseen painettujen komponenttien valmistus on nopeampaa, materiaalihukka pienempää ja valmistuslämpötila on matalampi (2). Painettava elektroniikka ei tule korvaamaan piipohjaista tuotantoa, vaan tarjoaa lisämahdollisuuksia komponenttituotantoon (2). Kuvassa 9 on esimerkki painettavan elektroniikan sovelluksesta.



KUVA 9. Joustava lämpötilasensori (16)

Joustava alustamateriaali mahdollistaa valmistuksen rullalta rullalle. Rullaprosesseissa voidaan painaa virtapiirejä komponentteineen jopa kilometrien pituisille kalvoille (2, s. 14). Kuvassa 10 on rullalta rullalle -valmistukseen tarkoitettu laite.



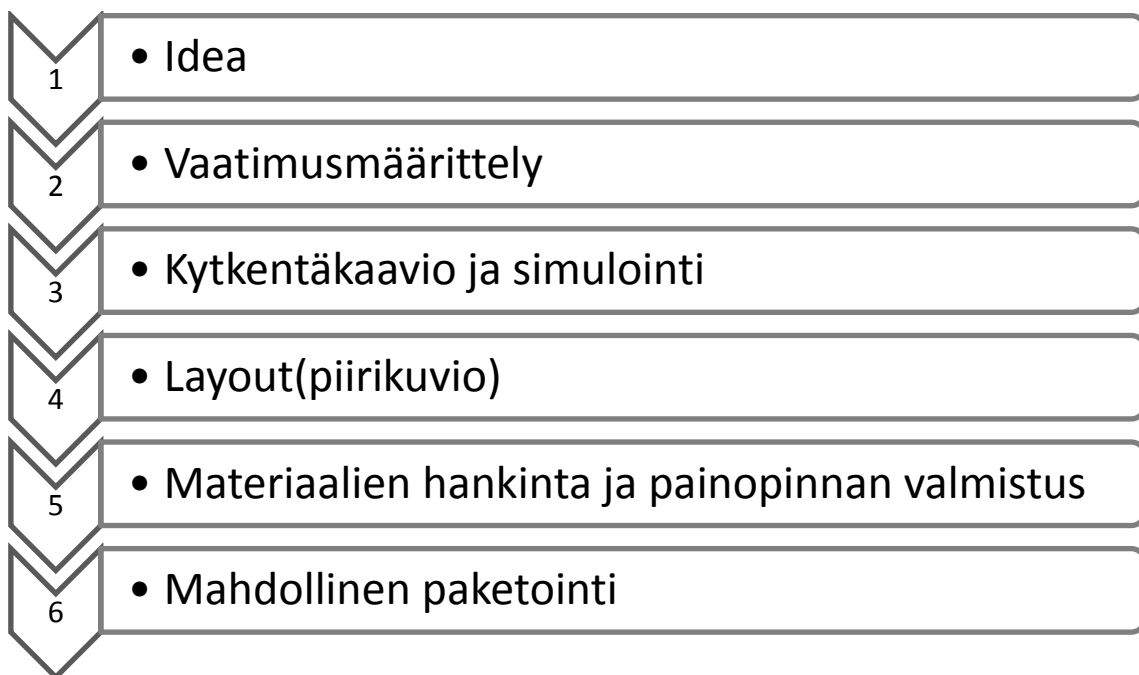
KUVA 10. PrinLabin rullaprosesseihin soveltuva laite (2)

Painotekniikoita ovat silkkipaino, offsetpaino, flexopaino, syväpaino, pad printing, kuumapuristus, mustesuihku, dispensointi ja Aerosol Jet. Painotekniikoiden välillä hinta, tulostustarkkuus ja valmistusaika kilpailevat pääasiassa keskenään. Digitaaliset painotekniikat, esimerkiksi mustesuihku ja dispensointi, mahdollistavat muutosten teon tuotteisiin nopeasti ja pienin kustannuksin. Jos mustesuihkutulostekytkenään täytyy tehdä muutos, tarvitsee vain muokata digitaalista tiedostoa kytkennästä ja jatkaa tulostusta. (2.)

Painettavassa elektroniikassa on vielä kehitettävää sekä painotekniikoissa että materiaaleissa. Erityisesti materiaalit vaativat kehittämistä, sillä musteiden ja alustojen materiaalivaatimukset ovat erittäin tiukat. Vain tietyntyyppiset materiaalit sopivat painokoneisiin ja vaatimuksia tulee lisää sovelluksesta riippuen. Materiaalit joutuvat kestämaan erilaisia ympäristön olosuhteita valmistuksen aikana (esimerkiksi lämpö, vääntö) ja lisäksi materiaalien vaatimukset voivat olla osin ristiriitaisia (esimerkiksi musteen prosessointi nestemäisenä ~ musteen nopea kuivuminen). (2.)

4.1.1 Valmistusprosessi

Elektroniikkaa sisältävän tuotteen valmistus painamalla on monivaiheinen prosessi. Kuvassa 11 on esitetty, miten valmistusprosessi voisi edetä vaiheittain ideasta tuotteeksi. Kuvan tarkoitus on koota painoprosessin eri vaiheet ja prosessiin vaikuttavat asiat yhdeksi helpommin havainnollistettavaksi kokonaisuudeksi. Vaiheiden eteneminen aikajärjestyksessä ei ole ehdoton. Yksi tuote voi vaatia monta erillistä painoprosessia.



KUVA 11. Painettavan tuotteen valmistusprosessin vaiheita (2)

Ideointi, vaatimusten kartoitus ja kytkentäkaavion laadinta (vaiheet 1 ja 2)

Ensimmäiseksi tarvitaan tuoteidea, jonka pohjalta tehdään tuotteen vaatimista teknisistä ominaisuuksista vaatimusmäärittely. Vaatimusmäärittely vaikuttaa painotekniikan ja materiaalien valintaan. Yksi tuote voi koostua useista moduuleista, joista kukin vaatii oman valmistusprosessin.

KytKentäkaavion laadinta, simulointi ja layoutin suunnittelu (vaiheet 3 ja 4)

Tuotteen kytkennästä laaditaan kytkentäkaavio, joka kannattaa testata simulointiohjelmalla ja mahdollisuuksien mukaan myös perinteisin komponentein tehdyl-

lä kytkennällä. Kytkenäkaavion perusteella tehdään layout eli piirikuvio, johon piirin johtimet ja komponentit piirretään todellisten mittojen mukaan. Tämä vaihe vastaa piirilevyn suunnittelua perinteisissä valmistusmenetelmissä.

Materiaalien hankinta ja painopinnan valmistus (vaihe 5)

Materiaalien ominaisuuksilla on suuri merkitys suorituskyvyn ja kustannusten muodostumisessa, joten materiaalin kehittämiseen kannattaa panostaa. Testaus on osa materiaalien kehittämistä. Painoprosessiin tarvitaan alustamateriaalit ja musteet sekä muita tarvikkeita painotekniikasta riippuen. Painotekniikka asettaa omat rajoitteensa materiaaleihin, joten materiaalit hankitaan painotekniikan mukaan. Seuraaviin luetteloihin on poimittu painoprosessiin vaikuttavia musteen ja alustamateriaalin ominaisuuksia.

Musteen valinnassa huomioitavia ominaisuuksia ovat

- pintajännitys
- viskositeetti
- kuivumisaika
- johtavuus
- eristävyys
- kutistuminen (2).

Alustamateriaalin valinnassa huomioitavia ominaisuuksia ovat

- pintaenergia
- huokoisuus
- joustavuus/paksuus
- johtavuus
- läpinäkyvyys
- lämmönkesto
- kemiallinen aktiivisuus (2).

Jokaisella painotekniikalla on omat painojälkeen vaikuttavat muuttujat painokoneistossa. Esimerkiksi painotelan kuvioon, silkkipainon painoverkkoon ja

mustesuihkun pisarasuihkuun liittyy useita painojäljen kannalta oleellisia muuttujia.

Painopinnan valmistus silkkipainossa tarkoittaa piirikuvion valmistusta verkkoon UV-valon ja emulsion avulla. Syväpainossa painokuvio koverretaan painosylinteriin. Flexopainossa painotelan kuvion muodostaa UV-valolla painotelan pintaan kovetettu hartsikerros. Offset-painossa painokuvio muodostetaan kovettamalla fotopolymeeri UV-valolla painotelaan. (2). Testierien valmistuksessa digitaalisia tekniikoita kannattaa suosia, sillä muutokset voidaan tehdä helposti painokuvioon ja tulostusta voidaan sen jälkeen jatkaa. Syväpainossa muutokset painokuvioon vaativat uuden painosylinterin (kuva 12).



KUVA 12. Syväpainossa painokuvio koverretaan painosylinteriin (2)

Isojen erien valmistaminen on kustannustehokasta, mutta pienten erien valmistuksessa painotekniikan vaatimat tarvikkeiden kulut ovat herkästi suurin menoerä. Esimerkiksi mustesuihkutulostuksessa tarvitaan mustekasetti, jonka hinta on noin 60 euroa (17). Mustekasetti on kertakäyttöinen. Silkkipainossa tarvitaan verkko, jonka hinta on noin 100 – 150 euroa (17). Syväpainotelan hinta on noin 600 euroa (2).

Paketointi (vaihe 6)

Viimeisessä vaiheessa tuote voidaan paketoida esimerkiksi laminoimalla tai pakkaamalla vakuumiin varastoinnin ajaksi. Painetut tuotteet ovat herkkiä happeen tunkeutumaan, joten niiden suojaaminen ympäristön vaikutuksilta on huomioitava. Paketoinnilla voidaan nostaa tuotteen elinikää.

4.1.2 Haasteet

Painettava elektroniikka on vielä kehitysasteella oleva ala. Vaikka ideoita painettavan elektroniikan sovelluksista ilmaantuukin, ensimmäisen testiversion valmistuminen voi vaatia paljon aikaa ja työtä. Muste- ja alustamateriaaleja kehitetään kokoajan, mutta nykyinen saatavuus on rajoitettua (2). Lisäksi eri tuotteisiin musteen ja alustan kehittäminen/optimointi juuri omaan sovellukseen sopivaksi voi olla työlästä ja aikaa kuluttavaa, mutta tuotteen sähköisen suorituskyvyn maksimoimiseksi suositeltavaa.

Piirikuvioiden suunnittelu asettaa myös omat haasteensa. Alustamateriaaleille voidaan tulostaa kaksipuoleisesti, mutta läpiviennit eivät vielä onnistu ilman käsityötä (18). Kohdistustarkkuus on vielä mikrometritasolla ja tämän vuoksi ongelmia voi tulla läpinäkyvien materiaalien kanssa (2). Standardeja ja suunnittelusääntöjä ei juurikaan vielä ole painettuun elektroniikkaan (2).

Painamalla tehtyjen tuotteiden elinikä on lyhyt, mikä kannattaa huomioida varastoinnissa ja kierrätettävyydessä. Kaikkien komponenttien valmistus painamalla ei onnistu ainakaan vielä, eikä kaikkia edes ole kustannusmielessä järkevää painaa.

4.1.3 Soveltuvuus happisaturaatiomittariin

Painettavassa elektroniikassa on joitain korvaavia ratkaisuja pulssioksimetrin komponenteille. Piirilevy voidaan korvata joustavalla alustamateriaalilla ja lisäksi johtimet ja vastukset olisi mahdollistaa tulostaa tai painaa (18). Orgaanisten ledien eli OLEDien painaminen on mahdollista, mutta ne eivät sovellu vielä kestokulutustuotteisiin lyhyen eliniän vuoksi (3).

Virrankulutukseen kannattaa kiinnittää huomiota, koska se on tulostetuissa ho-
peajohtimissa suurempaa kuin perinteisissä kuparijohtimissa. Vastusten tulos-
tamisessa kannattaa huomioida, että niiden resistanssin arvo vaikuttaa suoraan
tarvittavaan tulostuspinta-alaan. Mahdollisesti myös kanavatransistoreiden tu-
lostus onnistuu, jos sitä päätetään käyttää kytkinkäytössä ledien virtojen ohja-
uksessa. Kondensaattoreita ja vahvistimia ei voida ainakaan vielä painaa. (18.)

Näyttöjen painaminen on mahdollista. BASF-materiaaleilla, esimerkiksi 7-
segment näytön painaminen on mahdollista VTT:llä (19). ARCEO ja Plastic Lo-
gic -yritykset painavat myös näyttöjä (19). Näytöistä ei löytynyt tarkkoja selvityk-
siä teknisistä ominaisuuksista, joten niiden soveltuvuutta ei tutkittu tarkkaan.
Kuvassa 13 on Plastic Logicin painamalla valmistettu näyttö.

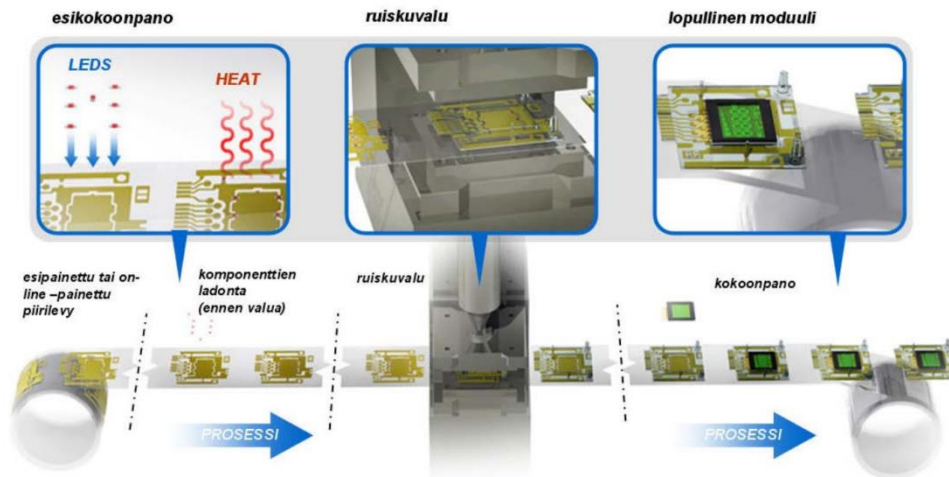


KUVA 13. Plastic Logicin painama näyttö (20)

4.2 Painetut hybridisysteemit

Hybridivalmistuksella tarkoitetaan valmistusprosessia, jossa yhdistetään eri
valmistusmenetelmiä suorituskyvyn ja hinnan optimoimiseksi (3, s.14). Hybri-
disysteemiin saadaan näin enemmän toiminnallisuutta kuin pelkästään paino-
tekniikoita käyttäen. Hybridivalmistuksessa painettavaan/tulostettavaan elektro-
niikkaan voidaan yhdistää muun muassa laserkäsittely, piipohjaisten kompo-

nenttien ladonta, laminointi, leikkaus ja ruiskuvalu (2). Kuvassa 14 on esimerkki hybridadmistusprosessista.



KUVA 14. Hybridadmistus (3 s. 25)

Hybridadmistusprosessin täysivaltaisella hyödyntämisellä mahdollisimman valmiin tuotteen saamiseksi voidaan pienentää kustannuksia ja parantaa valmistusprosessin hallintaa. Kustannuksia saadaan pienennettyä tuotteen jatko-työstön tarpeen vähenemisessä sekä komponenttien tavaratoimitus- ja varastointikuluissa. Alustamateriaali on myös paljon edullisempaa kuin piirilevy, varsinkin, jos tarvitaan isoja pinta-aloja. Lämpötilankesto on pienempi kuin perinteisissä piirilevyissä. (18.)

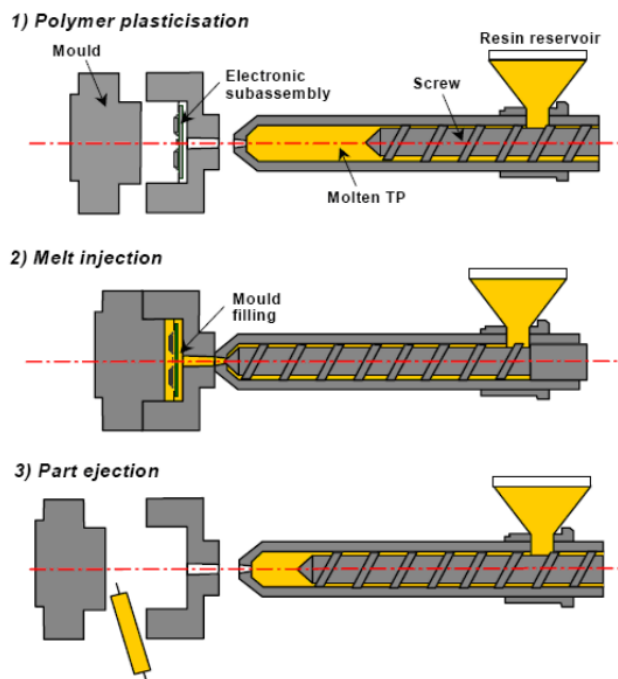
4.2.1 Ladonta ja liimaus

VTT:llä on komponenttien ladontaan ja liimaukseen laite, EVO, jolla voidaan rullaprosessina ladata komponentteja tuotteeseen. Ladontaa ei voida tehdä liikkeessä, joten raita pysäytetään ladonnan ajaksi. Rullamuotoista ladontaprosessia kutsutaankin stop&go-prosessiksi. Laite pysäyttää alustan liikkeen jokaisen sheetin kohdalle, jolloin ladotaan ei-tulostettavat pintaliitoskomponentit. Tämän jälkeen raita liikkuu yhden sheetin verran. Tarkoituksena on valmistaa tuotteet yhtenä rullana niin pitkälle kuin mahdollista ennen kuin katkaistaan yksittäisiksi piirilevyiksi. (18.)

VTT:n EVO-laite pystyy laittamaan alustalle todella pieniä komponentteja, esimerkiksi Kari Röngän näyttämät ledit, joita mahtui kolme kappaletta yhden millimetrin alueelle. Ladotut komponentit voidaan kiinnittää joko kylmä- tai kuumamenetelmällä komponenttien lämmönsietokyvyn mukaan. Kylmäkiinnityksessä komponentit kiinnitetään johtavalla liimalla, joko dispenserillä tai dippaustekniikalla. Kuumakiinnityksessä voidaan jokainen komponentti erikseen lämmittää tarvittavaan lämpötilaan, jotta liima saadaan kovetettua. On myös kiinnitysmateriaaleja, jotka voidaan kovettaa UV-valolla. (18.)

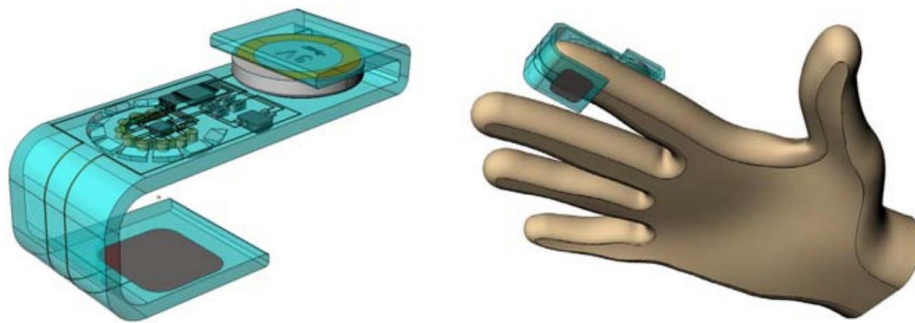
4.2.2 Ylivalu

Ylivaluprosessissa muovikalvon ja ruiskuvalumateriaalin tulee olla keskenään yhteensopivia. Ennen valua painettuun kalvoon ladotaan erilliskomponentit, ja lisäksi kalvo muovataan, leikataan ja asemoidaan muottiin. Ruiskuvalukoneella voidaan tuotteeseen tehdä myös optisia rakenteita. Esimerkiksi ylivalulla ledien valon levitys 7-segment-näyttöä varten on mahdollista. Kuvassa 15 on esitetty periaatekuva ruiskuvalukoneen ylivalusta. (3.)



KUVA 15. Elektroniikan ylivalu ruiskuvalukoneella (3, s. 52)

Ylivaletun tuotteen kestävyys paranee eri ympäristötekijöitä, kuten kosteutta ja ilman epäpuhtauksia, vastaan. Elektroniikan valu muovin sisälle helpottaa myös puhdistusta, jonka merkitystä ei voi vähätellä esimerkiksi terveydenhuollon laitteissa (3). Kuvassa 16 sormenpääpulssioksimetrin elektroniikka on sijoitettu muovin sisään.



KUVA 16. Sormenpääpulssioksimetri (3, s. 31)

5 PROTOTYYPPI

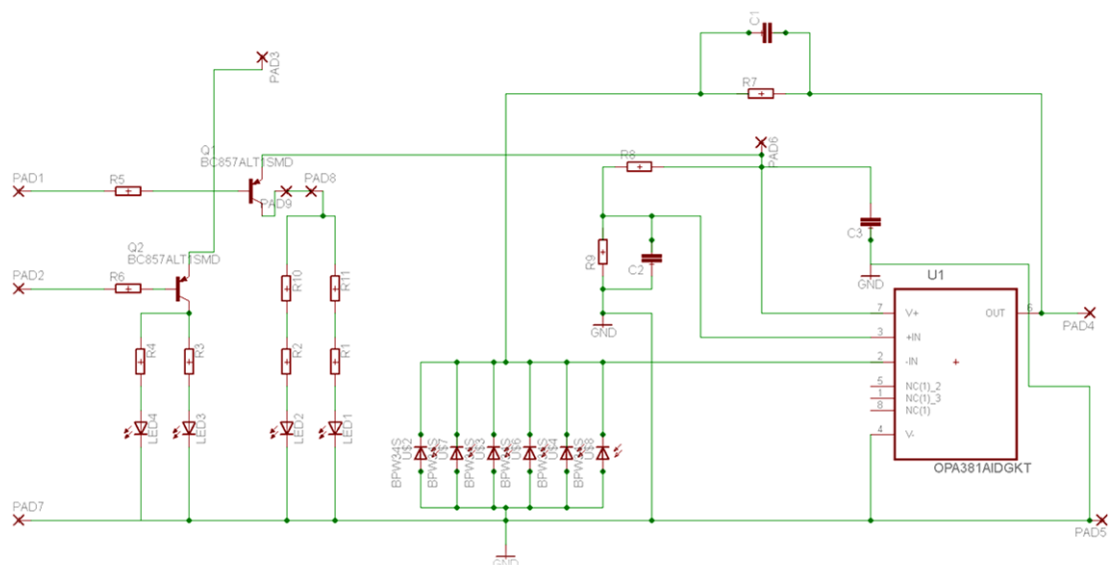
Opinnäytetyöhön kuului todentaa selvitystyön tuloksia käytännössä. Käytännön osuuteen tuli sisällyttää painettavaa elektroniikkaa mahdollisuuksien mukaan. Tuloksien todentamiseksi rakennettiin pulssioksimetrissa prototyyppi joustavalle piirilevyille. Prototyypin kalibrointi ei kuulunut opinnäytetyöhön. Prototyyppi valmistettiin aiemman Oamk:n ja Spektikor Oy:n välisen projektin prototyypin kytkentää ja tuloksia hyödyntäen. Prototyypin testauksessa ilmeni, ettei prototyypin kytkentä sellaisenaan soveltunut happisaturaation mittaamiseen. Opinnäytetyössä rakennettiin toinen prototyyppi mittaustekniikan kehittämistä varten. Tässä luvussa kerrotaan prototyyppien suunnitteluista, valmistuksista, testauksista ja tuloksista.

5.1 Painettavaa elektroniikkaa sisältävä prototyyppi

5.1.1 Kytkennän suunnittelu

Prototyypin rakentaminen aloitettiin suunnittelemalla kytkentä. Oamk:n PrinLa-bissa pidettiin palaveria 7.6.2013. Palaverissa sovittiin yhteistyöstä ja tehtiin alustavia suunnitelmia prototyypin valmistuksen etenemisestä. Aiemman Spektikor Oy:n ja Oamk:n välisen Happi-projektin prototyypin kytkentä todettiin hyväksi lähtökohdaksi opinnäytetyön prototyypin kytkennälle. Kytkentä perustuu OPA381-datasheetin käyttöesimerkkeihin.

Edellä mainittua kytkentää käytettiin pohjana opinnäytetyön prototyypin suunnittelussa. Pieniä muutoksia kytkentään tehtiin: lisättiin kytkentään fotodiodeja, mitoitettiin vastukset uudelleen ja tarkasteltiin komponenttien toimintatapa. Jalliset komponentit vaihdettiin pintaliitoskomponentteihin, jotta ne soveltuvat painettavan elektroniikan alustamateriaalille. Kytkentäkaavio piirrettiin Eagle 6.4.0 -ohjelmalla. Puuttuvat komponentit tilattiin Farnellilta. Kytkentäkaavio on esitetty kuvassa 17.



KUVA 17. Prototyypin kytkentäkaavio

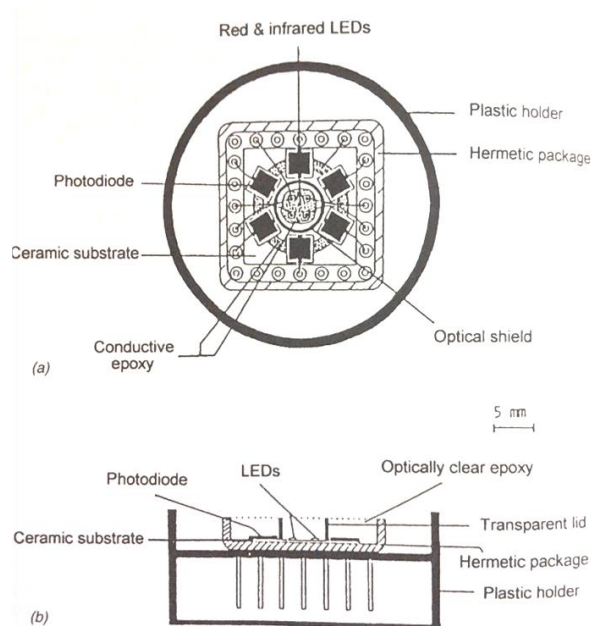
Ledien ohjauksessa käytettiin kytkiminä transistoreja(BC857). Transistorien eteen laitettiin 1,2 k Ω :n vastukset (kuvassa R5 ja R6). Ledien etuvastukset mitoitettiin pienemmän virrankeston eli punaisen ledin mukaan. Käyttöjännitteenä oli 5 V. Ledien etuvastuksiksi laitettiin 390 Ω :n vastukset (kuvassa R1, R2, R3 ja R4). IR-ledin virrankesto oli 10-kertainen punaiseen verrattuna. Kytkentään laitettiin kahdelle vastukselle paikat (R10 ja R11), jos valotehot eivät täsmää punaisten ledien kanssa. Fotodiodit (BPW34S) kytkettiin rinnan, jolloin kynnysjännite pysyy samana, mutta kynnysjännitteen muutosherkkyys moninkertaistuu. Maan ja käyttöjännitteen välille laitettiin 1 μ F:n kondensaattori (kuvassa C3). Vahvistimena oli OPA381. Takaisinkytkennässä oli 470 k Ω :n vastus (kuvassa R7), joka vaikuttaa vahvistuksen suuruuteen. Vastuksien kotelotyyppinä käytettiin 0603:a. Kytkentään laitettiin myös komponenteille paikat vahvistinpiirin suodatusta (C2) ja biasjännitettä (jännitejako, kuvassa R8 ja R9) varten, mutta prototyypissä näitä ei käytetty.

Näyttönä käytettiin kaksinumeroista seven-segment-näyttöä, jolle tehtiin InkJetillä johdotus. Jokaiselle ledille laitettiin oma etuvastus, joka oli suuruudeltaan

82 Ω (käyttöjännite 3,3 V). Arduino Megassa näytön jokaiselle ledille on oma digitaalinen kanava, jonka kautta näyttöä voidaan ohjata.

5.1.2 Layoutin piirtäminen

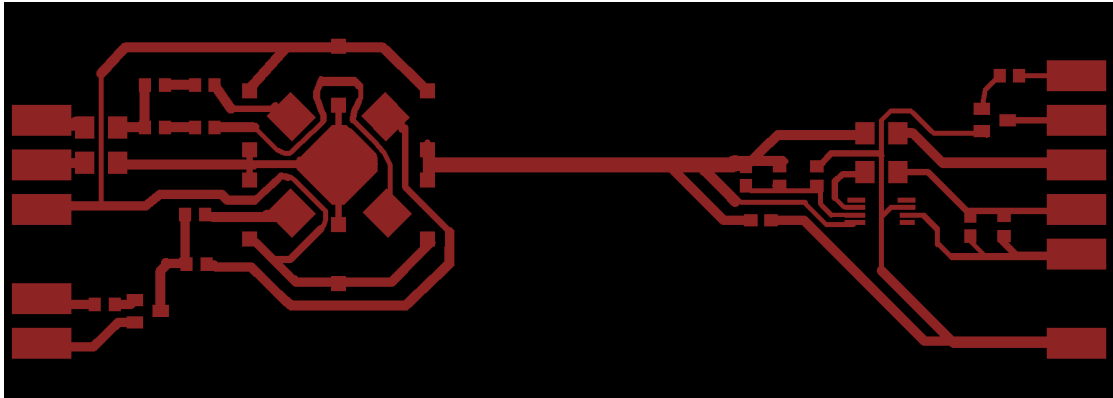
KytKentäkaaviota tehtäessä Eagle-ohjelma piirtää toiseen ikkunaan piirikuviota varten komponenteille kotelotyypin mukaiset pädit. Painettavassa elektronikkassa piirikuviota kutsutaan layoutiksi. Pädit ovat komponenttien ja piirilevyn kontaktin luomista varten. Piirikuvio piirrettiin yksipuoleiseksi. Eristevälien tuli olla riittävät. Jumpperivastuksia (kotelotyyppi 1206) käytettiin hyppylankoina. Pädit johdotettiin ja layout muokattiin sensorin mittojen mukaan sopivaksi. Anturin ledit ja fotodiodit sijoiteltiin kuvan 18 asettelun mukaan. Ledien etäisyydet fotodiodeihin ovat likimain samat kuin kuvan 18 etäisyydet.



KUVA 18. Anturi (6, s. 206)

Kuvassa 19 on prototyypin anturin layout. Layout on tarkoitus taittaa keskeltä, joten anturin kokoa saatiin pienennettyä. Layoutin päissä olevat pädit liitetään myöhemmin yhteen eli käytännössä läpiviennit tehdään layoutin ulkopuolella. Myöhemmin pädien kokoa voidaan muuttaa joustavan materiaalin 2-puoleiselle liittimelle sopivaksi. Prototyypivaiheessa liitin olisi yksi epävarmuustekijä lisää.

Layout on piirretty kuvan 17 kytkennän mukaan, mutta layoutiin on lisäksi lisätty pädejä ja muokattu niiden kokoa siten, että anturi koko pysy suunnitelmien mukaisessa koossa (ks. kuva 18).



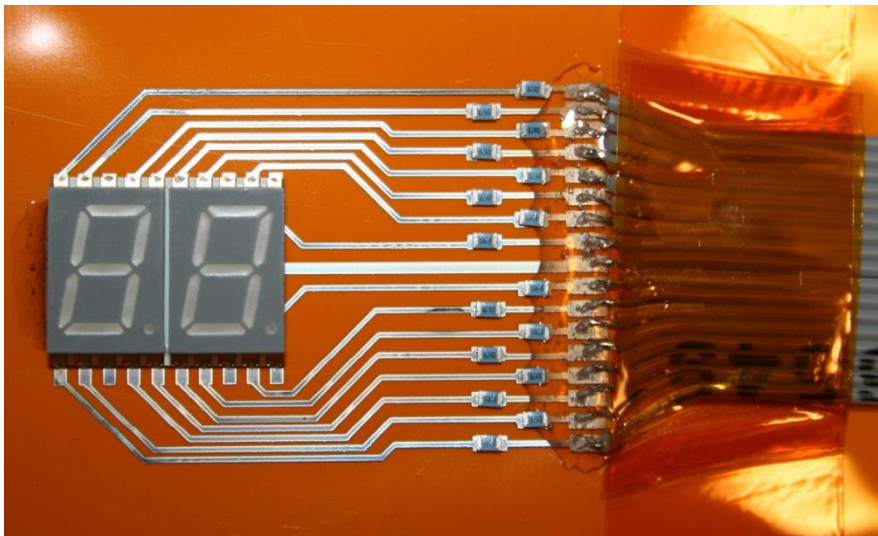
KUVA 19. Pulssioksimetrin anturin layout

Näytön ohjausta varten piirrettiin oma layout. Layoutit muokattiin lopulliseksi Adobe Photoshop -ohjelmalla, jotka tulostettiin PrinLabin Inkjet-tulostimella. Tulostaminen vaati omat alkuvalmistelut. Niihin kuuluivat muun muassa mustekasetin täyttäminen, alustamateriaalin eli substraatin leikkaus, lämpötilan asettaminen suuttimelle ja alustalle sopivaksi ja kuvan muokkaus InkJet-tulostimen ymmärtämään muotoon. Alustamateriaalin puhtaus varmistettiin isopropanolilla. Tulostuksen jälkeen piirikuvio kuivatettiin 220 °C:ssa tunnin ajan. Mustekasetti säilyi lähes kaksi viikkoa käyttökelpoisena, vaikka mustekasetteja pidetään kertakäyttöisinä.

5.1.3 Komponenttien liimaus

Komponentit kiinnitettiin tulostettuun layoutiin johtavalla liimalla mikroskoopin alla. Liima oli 2-komponenttiliimaa, joka sekoitettiin ja laitettiin ruiskuun. Ruiskun kärkeen laitettiin neula, joka helpotti tarkkuutta vaativaa liimausta. Liima säilytettiin jääkaapissa. Kokonaisuudessaan prototyyppiin kului alle millilitra liimaa. Liimaukset vaativat kolmen tunnin kuivatuksen 80 °C:ssa. Komponenttien liimaus suoritettiin osissa, joten siihen kului runsaasti aikaa. Liimauksen osittamisella oli myös puolensa; liimauksen epäonnistuessa layoutin puhdistaminen oli hel-

pompaa, kun ei tarvinnut varoa viereisiä komponentteja. Niiden liikahtelut olisi aiheuttanut lisää oikosulkuja kytkentään, mikä olisi taas vaatinut lisäpuhdistusta ja uudelleenliimausta. Komponenttien kiinnitys layoutiin onnistui hyvin, mutta johtimien liimaus oli haastavampaa. Kuvassa 20 on tulostettu näytön layout. Layout-kuvioon on liimattu seven-segment-näyttö, vastukset ja johtimet. Johtimien liimausta on vahvistettu epoksiliimalla.



KUVA 20. InkJetillä tulostettu näytön layout, johon on liimattu komponentit ja johtimet

5.1.4 Testausta ja tuloksia

Kytkeä testattiin ensin yleismittarilla ja sitten oskilloskoopilla. Arduino Megaan koodattiin yksinkertainen ohjelma, jolloin punaisia ja IR-LED:ejä vilkutettiin vuorotellen, aina 5 sekuntia kerrallaan (liite 1). Prototyypin kytkentä toimi kuten pitääkin, mutta komponentit eivät olleet vielä tasapainossa keskenään. Valtimon pulsaatiota ei saatu näkymään oskilloskoopilla, joten punaisen ledin etuvastuksia pienennettiin 390 ohmista 100 ohmiin, vaikka maksimivirta ylittyikin. IR-ledien etuvastukset pienennettiin 200 ohmista 182 ohmiin (vastuksina 100 Ω ja 82 Ω sarjassa). Edelleenkin vastukset eivät olleet tasapainossa keskenään. Painamalla valmistetun prototyypin komponenttien vaihtaminen on työlästä ja aikaa vievää. Prototyypin käsittelyssä painokuvio herkästi vahingoittui ja kom-

ponentit ja johtimet irtoilivat. Korjaus vaati aina uuden liimauksen ja liiman kovettamisen uunissa.

Ledien vilkuttaminen testauksen aikana oli tärkeää, etteivät erityisesti punaiset ledit ylikuumentuneita ja vioittuneita. Muutenkin ledien jatkuva päällä pitäminen kuumentaa ledejä, ja tekee testaamisen epämiellyttäväksi. Ledien ja fotodiodien väliin laitettiin kumi estämään ledin valon pääsyä suoraan fotodiodille.

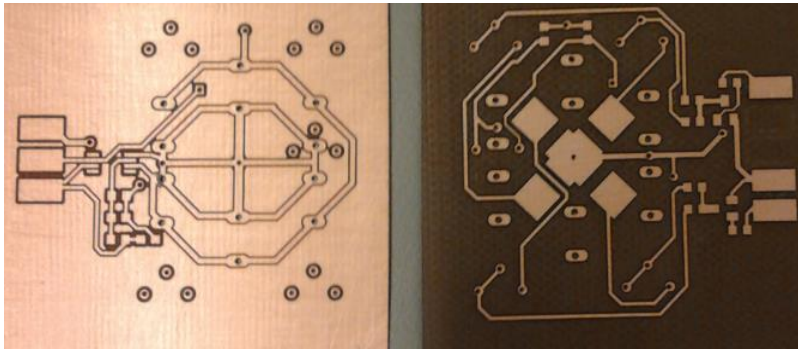
Punaisten ledien käyttöjännitejohdon liitoksessa oli kosketushäiriöitä. Johtoa jouduttiin liimaamaan useita kertoja. Piirilevyn taitoskohdan kanssa ei ollut ongelmaa. Pientä kulumista kuitenkin taitoskohdan johtimessa voi havaita, mutta todennäköisesti jo laminointi olisi estänyt kulumisen. PrinLabissa ei ollut laminointilaitetta, joten laminointi jäi testaamatta. Testatessa prototyyppiä joudutaan käsittelemään normaalikäyttöä kovakouraisemmin, joten mittarin kytkennän jatkokehittely painettavaa elektroniikkaa integroidulla prototyypillä todettiin toivottomaksi.

Painettavaa elektroniikkaa integroitu prototyyppi toi joitain tuloksia. Painettavaa elektroniikkaa voi käyttää osana pulssioksimetrin elektroniikkaa, kunhan mittaustapaa on tutkittu ensin enemmän. Alustamateriaalina voisi jäykempi kalvo olla parempi.

5.2 Prototyyppi mittaustekniikan kehittämiseen

5.2.1 Piirilevyn valmistus

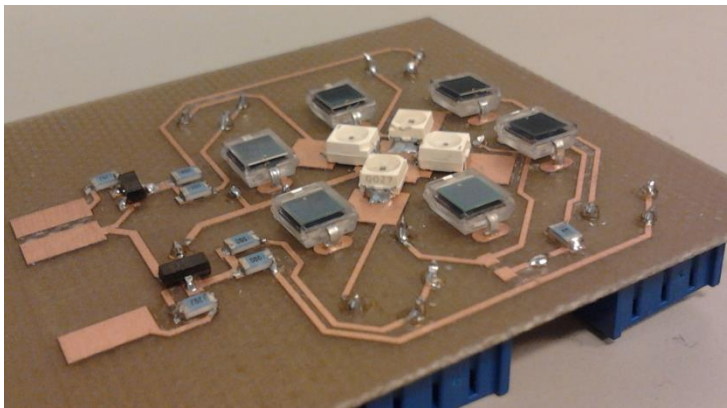
Painettavan elektroniikan prototyypin lisäksi valmistettiin prototyyppi myös perinteiselle piirilevylle. Prototyyppi tehtiin mittaustekniikan kehittämistä varten. Säättömahdollisuuksin varustettu prototyyppi on kytkennältään vastaava kuin painettavaa elektroniikkaa integroitu prototyyppi, mutta osa kiinteistä vastuksista on korvattu säätövastuksilla. Piirilevy piirrettiin kaksipuoleiseksi Eagle-ohjelmalla. Fotodiodit vaihdettiin vastaaviksi jalallisiksi komponenteiksi (BPW32). Valmistus tehtiin ilman läpikuparointia, jotta jalalliset komponentit on tarvittaessa helpompi vaihtaa. Kuvassa 21 näkyvät piirilevyn molemmat puolet.



KUVA 21. Prototyypin piirilevykuvio molemmilta puolilta

5.2.2 Säättömahdollisuudet

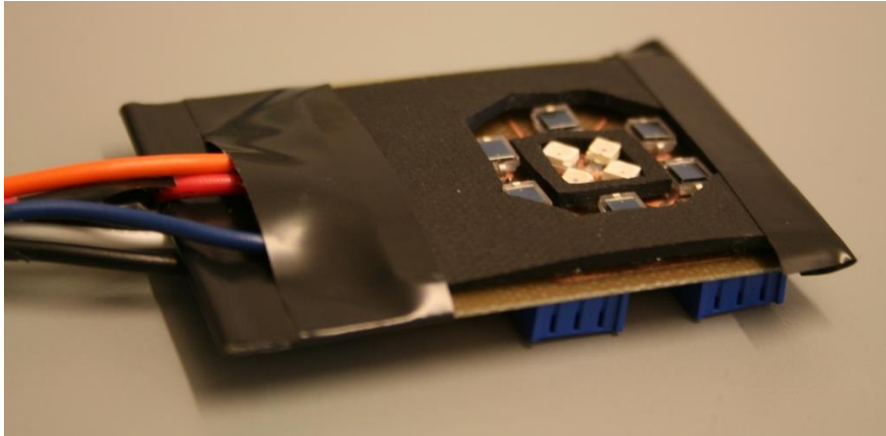
Säättövastuksien avulla on tarkoitus selvittää tarkat vastuksien koot, jotta kytkentä olisi optimaalinen happisaturaation mittaamiseen. Kuvassa 22 on piirilevy komponentteineen. Säättövastukset ovat alapuolella, jotta ne eivät häiritse mittauksia. Myöhemmin säätövastukset voidaan korvata kiinteillä vastuksilla ja anturi saadaan ohueksi.



KUVA 22. Prototyyppi komponentteineen

Prototyyppiin laitettiin ledien, punaisten ja IR-ledien, etuvastuksiksi pienet kiinteät vastukset. Punaisten ledien etuvastukset ovat $100\ \Omega$:n suuruisia ja IR-ledien $330\ \Omega$:n suuruisia. Niiden kanssa sarjassa ovat $200\ \Omega$:n säätövastukset. Näillä on tarkoitus säätää ledien valaisutehot optimaaliseksi mittauksen kannalta. Säättövastuksilla säädetään ledeille valaisuteho riittävän valtimon pulsaation tunnistamista varten. Ledien ja fotodiodien välinen etäisyys vaikuttaa tarvittavan

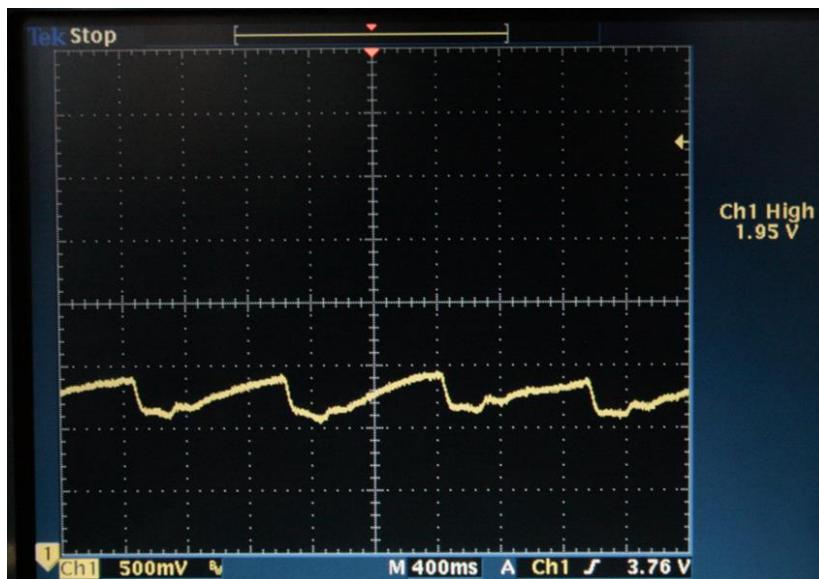
valaisutehon määrään. Etäisyyden ledien ja fotodiodien välillä täytyy olla riittävä, jotta happisaturaatio saadaan juuri oikealta syvyydeltä kehosta, valtimosta. Ledien ja fotodiodien väliin laitettiin myös tässä prototyypissä kumia estämään valon pääsyn suoraan ledistä fotodiodiin (kuva 23).



KUVA 23. Mittausta häiritsevä valo on estetty kumilla

5.2.3 Testaus ja tulokset

Prototyypin liitokset tarkastettiin ensin yleismittarilla. KytKentää testattiin sitten . oskilloskoopilla. KytKentä osoittautui toimivaksi. Ledien vilkuttaminen oli edelleenkin tärkeää, etteivät ledit ylikuumene ja vioitu. Prototyypin vastukset säädettiin sellaisiksi, että pelkästään toisten ledien ollessa päällä, joko punaisten tai IR-ledien, valtimon pulsaatio näkyi noin 500 mV:n suuruisena 2 – 3 V:n DC-jännitteen päällä. Kuvassa 24 näkyy oskilloskoopin näytöllä valtimon pulsaatio.



KUVA 24 . Kaulavaltimon pulsaatio oskilloskoopin näytöllä

Pulsaation saaminen näkyviin kertoo toimivasta mittaustekniikasta. Signaali muistuttaa kuvan 3 aaltomuotoa. Kaulavaltimosta mitattaessa aiheutuu signaaliin herkästi häiriöpiikkejä esimerkiksi pään liikkeistä ja nielaisusta. Vaatii kuitenkin lisää testaamista, löytääkö kaulan alueelta sellainen kohta, jossa nämä ongelmat eivät häiritsisi.

6 JATKOKEHITYS

6.1 Painettava elektroniikka ja hybridi valmistus

Näyttö, vastukset ja mahdolliset kanavatransistorit voidaan painaa joustavalle piirilevylle. Kukin komponentti vaatii kehittämistä, koska komponenttien ominaisuudet tulee olla hallinnassa luotettavan mittarin kehittämisessä. Tarkat komponenttien arvot toleransseineen tulee selvittää, ennen kuin painettavan elektroniikan integrointi pulssioksimetriin on ajankohtaista.

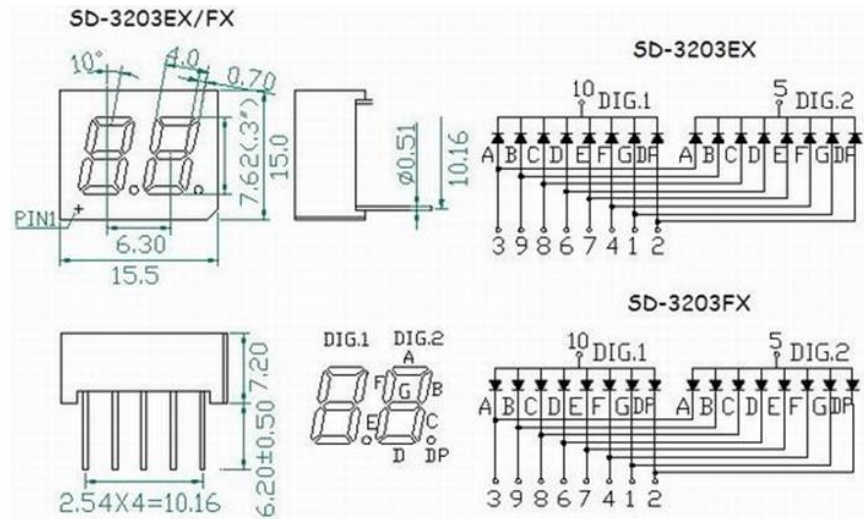
Jatkokehityksen edetessä kannattaa harkita, tarvitseeko piirilevyn olla niin joustavaa kuin prototyypissä käytetty polyimidi. Alustamateriaaleja on saatavilla eri paksuuksilla, ja lisäksi muitakin alustamateriaaleja on olemassa. Kannattaa myös miettiä, tarvitseeko piirilevyn olla ylipäättään taipuisa, sillä komponenttien kiinnityksen jälkeen kalvo voitaisiin ylivalaa. Ylivalettu kalvo on jäykkä ja mittariin saataisiin luotettavuutta ja puhdistaminen olisi helpompaa. Ylivalulla voitaisiin myös tehdä näytön ledien päälle optinen levitys, jos seven-segmentti-näyttö päätetään rakentaa itse.

6.2 KytKentä

KytKentään kannattaa suhtautua kriittisesti. Ei kannata olettaa, että prototyypin kytKentä sellaisenaan olisi paras mahdollinen. Prototyypin kytKentä on kuitenkin lupaava, sillä valtimon pulsaatio saatiin näkymään kaulavaltimosta sekä punaisilla että IR-ledeillä. Punaisten ledien ohjeellinen maksimivirta (10 mA) ylittyy herkästi tarvittavan valotehon saamiseen, joten vaihtoehtoisia suuremman virrankeston 660 nm:n ledejä kannattaa etsiä.

Jos näytön ohjaukseen halutaan mahdollisimman vähän johtoja, kannattaa kytKentä muuttaa kuvan 25 mukaiseksi. Jokaisen numeron vastaavat segmentit yhdistetään, jolloin näytön johtojen määrää pystytään pienentämään. Yhdistettyjä segmenttejä vilkutellaan ohjelmallisesti niin nopeasti, ettei silmä erota, etteivät segmentit ole yhtä aikaa päällä. Näyttö voitaisiin painaa VTT:llä joko suoraan

siihen soveltuvilla materiaaleilla tai rakentaa ledeillä, joiden valo levitetään optisesti ylivalun avulla.



KUVA 25. Ehdotus näytön ohjauksen kytkentään (21)

6.3 Häiriöiden poisto

Perinteiselle piirilevyn prototyypin signaali vaatii mittaustilanteen tunnistamista ja häiriönpoistoa. Mittaustilanteen tunnistamisen voi tehdä kynnyksarvoja käyttämällä, sillä ulostulon jännite muuttuu rajusti, kun mittalaite tuodaan ihoa vasten ja fotodiodit peittyvät. Alipäästösuodatuksella tai/sekä keskiarvoistamalla dataa voisi signaalista saada siistimmän.

6.4 Optimaalinen mittauspiste

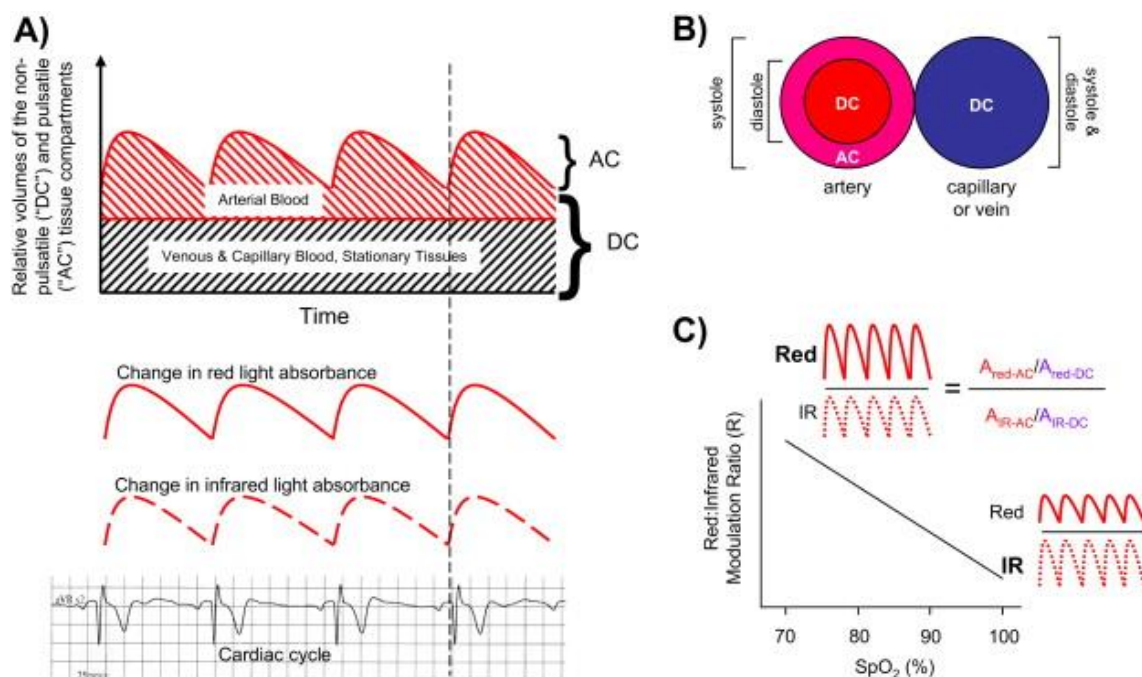
Optimaalisen mittauspisteen selvittämistä kannattaa selvittää. Kaulan alueella saattaa olla vähemmän häiriöherkkiä alueita, joissa signaaliin päänliikkeet ja nielaisut eivät vaikuta. Jos mittauspisteen ei tarvitse olla juuri kaulan alueella, esimerkiksi rintakehästä saattaisi löytyä pisteitä, joista happisaturaation saisi mitattua isosta valtimosta. Jos mittaus ei onnistu suoraan prototyypin kytkennällä, kannattaisi testata saataisiinko prototyypin signaalista parempaa yhdistämällä kytkentään sama "suodatus", jota käytettiin aivokudoksen happeutumiseen seurantaan tarkoitetussa NIRS-laitteessa (ks. luku 3.4.2). Optimaalista mittauspistettä voidaan etsiä opinnäytetyön yhteydessä perinteiselle piirilevylle tehdyllä

prototyypillä. Testauksessa kannattaa hyödyntää säätömahdollisuuksia. On muistettava, että kumiallergiset eivät saa olla testihenkilöinä, koska ledien ja fotodiodien välillä on kumia.

6.5 Happisaturaation määrittäminen

Happisaturaation laskeminen signaalista lasketaan 660 nm:n ja 940 nm:n pulsaation aikaisista absorptioista. Pulsaatio tulee siis näkyä signaalista kummallakin aallonpituudella. Pulsaation tulee olla riittävän suurta, jotta happisaturaation määrittäminen on luotettavaa. A/D-muuntimen tarkkuus on huomioitava..

Kuvan 3 ja 4 perusteella voidaan päätellä, että valtimon pulsaatio saadaan herkemmin näkyviin IR-ledeillä kuin punaisten ledeillä, koska hapellisen hemoglobiinin absorptio on suurempaa IR-taajuudella. Kuva 26 havainnollistaa happisaturaation määrittämistä pulssioksimetrilla.



KUVA 26. Happisaturaation määrittäminen pulssioksimetrilla (9)

Ehdotuksena on, että punaisten ja IR-ledien "offset"-jännite säädetään mahdollisimman samalle tasolle anturin ollessa ihon pinnalla kaulavaltimon päällä. Hapetsaturaatiosta kertova lukema lasketaan kuvan 26 yhtälön mukaan. Yhtälössä lasketaan absorptioiden suhde jakolaskuilla, koska etäisyys valtimosta vaikuttaa signaalin voimakkuuteen. Yhtälöstä voi päätellä, että kudokset absorptoivat punaista ja IR-valoa eri tavalla, sillä yhtälössä lasketaan AC-jännitteiden suhde DC-jännitteisiin. Jakolaskun tulos on hapetsaturaatiosta kertova lukema. Erillistä kalibrointiyhtälöä ei välttämättä tarvita, sillä SaO_2 -lukemathan ovat suhteellisia, prosenttiyksiköissä ilmoitettuja arvoja. Kalibrointiyhtälön tarve selvitetään testeillä.

7 POHDINTA

Opinnäytetyön tarkoitus oli tukea Spektikor Oy:n tuotekehitystä tutkimalla happisaturaatiomittarin elektroniikan korvaamisessa painettavaa elektroniikkaa. Myös piipohjaisten komponenttien ja painettavan elektroniikan yhdistävän hybridivalmistuksen mahdollisuuksia kartoitettiin. Selvitystyön tuloksia todennettiin rakentamalla kaksi prototyyppiä pulssioksimetrasta, jota varten syvempi perehtyminen happisaturaation mittaustekniikkaan oli tarpeen. Toinen prototyyppi todensi painettavan elektroniikan tuloksia ja toinen prototyyppi oli mittaustekniikan kehittämistä varten.

Syventyminen happisaturaation fysiologiseen taustaan ja mittaustekniikoihin auttoi luomaan laajan kokonaiskäsityksen happisaturaation mittaamisesta ja mittaamisen haasteista. Perehtyminen auttoi myös poimimaan olennaisia seikkoja painettavan elektroniikan ja hybridivalmistuksen osioista nimenomaan happisaturaatiomittariin liittyen. Kirjalliseen osioon tekniset yksityiskohdat pyrittiin kirjoittamaan mahdollisimman tarkasti jatkokehitystä ajellen, vaikka tämä jonkin verran vaikuttaakin tekstin luettavuuteen. Teoriaosuuden jäsentely ja koonti yhtenäiseksi kokonaisuudeksi oli haastavaa. Lisähaasteita toivat eri lähteiden terminologia ja vieraskielinen kirjallisuus.

Lähtökohtana prototyypin teossa oli edellisen Spektikor Oy:n ja Oamk:n välisen projektin prototyyppi, joka oli yksinkertaistettu versio pulssioksimetrasta. Dokumenteista poiketen mittarin toiminnassa oli periaatteellinen virhe. Elektroniikka oli toimivaa, mutta happisaturaatiota mitattaessa pulsaatiota ei saatu näkymään. Happisaturaation mittaus perustuu nimenomaan pulsaatioon. Tämä vaikutti myös opinnäytetyöhön. Opinnäytetyölle asetettiin tavoitteet olettaen prototyyppi toimivaksi, jolloin painettavaa elektroniikkaa integroitiin prototyyppiin turhan aikaisessa vaiheessa. Tämä näkyy tuloksissa myös painettavan elektroniikan osiossa. Painopiste siirtyi osin painettavasta elektroniikasta mittaustekniikan elektroniikan kehittämiseen.

Tutkimuskohteena opinnäytetyössä oli pulssioksimetri, joka mittaa happisaturaatiota tasomaiselta pinnalta, kaulavaltimosta. Tällaisesta mittauksesta, jossa happisaturaatio mitataan isosta valtimosta, ei löytynyt opinnäytetyön yhteydessä tietoa. Perifeeristen alueiden, aivokudoksen ja lihaksen happisaturaatiomittauksista löytyi tietoa, mutta näiden ”yhdistelmästä”, tasomaisen pinnan pulssioksimetrasta, ei löytynyt tietoa. Prototyypissä on siis oletettavasti jotain uutta. Uudenlainen mittaustapa yhdistettynä painettavaan elektroniikkaan ei ole fiksuin ratkaisu mittauksen toimintaperiaatteen tutkimisessa ja kehittämisessä. Opinnäytetyössä yhteydessä perinteiselle piirilevyllä tehty prototyyppi soveltuu kuitenkin mittaustekniikan jatkokehittelyyn.

Teorian pohjalta mittaukseen vaikuttavien asioiden suhteuttaminen keskenään on vaikeaa. Ongelmanratkaisussa punnittiin eri tekijöiden vaikutusta signaaliin. Esimerkiksi jos prototyypin ulostulosta tulee epämääräistä signaalia, oli haastavaa selvittää, mistä ongelma johtuu ja onko se useamman vian yhteistulos. Pohdittiin, absorptoivatko pintakudokset valoa niin paljon, ettei valtimosta heijastu sitä enää takaisin, onko vahvistus liian pieni, onko häiriö suurempaa kuin signaali, onko oskilloskoopin kaikki asetuksen oikein, onko ledien teho riittävä tai liian suuri vai onko kytkennässä sittenkin jokin liitos huono.

Jatkokehitystä varten teoriaosassa on vielä paljon ”käyttämätöntä”, mutta huomionarvoista tietoa. Teoriaosassa on tietoa siitä, milloin mittaukseen voi aiheutua virheitä käyttäessä valon 660 nm:n ja 940 nm:n aallonpituuksia. Esimerkiksi veren häikäpitoisuus (huomaa tupakoitsijat) ja anemia voivat aiheuttaa virhettä mittaustuloksiin. Vähintäänkin kalibroinnissa nämä kannattaa huomioida. Teoriaosan perusteella voidaan pohtia myös sitä, miten ongelmatilanteita voitaisiin välttää.

Esimerkiksi kun hyödynnetään isobestistä pistettä (810 nm) voidaan teoreettinen hemoglobiinikonsentraatio laskea. Tutkittavaksi jää, voidaanko silloin mittaustuloksista luotettavasti päätellä, sairastaako potilas anemiaa tai onko potilaalla häikämyrkytys. Olisi myös mielenkiintoista tutkia, voidaanko samaa mittalaitteistoa käyttää muuhunkin tarkoitukseen, esimerkiksi anemian tai bilirubinean

toteamiseen ilman verikokeita. Tähän perustuvia laitteita saattaa olla jo olemassa, mutta sitä ei ole tutkittu tämän opinnäytetyön yhteydessä.

Opinnäytetyö on ollut mielenkiintoinen kokemus, jossa teoriaa päästiin yhdistämään käytäntöön. Aihe on ollut todella laaja ja erityisen syvällinen perehtyminen jokaiseen kohtaan mahdotonta opinnäytetyön työmäärän puitteissa. Olen kuitenkin tyytyväinen tuloksiin, vaikka erityisesti mittaustekniikan kehittämisessä olisi tehnyt mieli edetä pidemmälle. Siirtymävaiheessa suunnittelusta toteutukseen on monia asioita, jotka jäävät pimentoon opinnoissa. Käytännössä tämä näkyi siinä, että prototyypin teossa komponenttien hankinnassa ja kytkennän suunnittelussa jouduin pyytämään neuvoa. Tuotteen suunnittelu ja sen toteuttaminen käytännössä on kuitenkin sitä, mitä tulevaisuudessa haluan työnä tehdä, mutta johon opintoihin liittyvät oppitunnit ja laboratorioharjoitukset eivät anna riittävästi valmiuksia. Tämä opinnäytetyö on kaventanut hieman tätä suunnittelun ja toteutuksen välistä kuilua.

LÄHTEET

1. Jeskanen, Petri – Linnamurto, Lari 2011. Fotopletysmografin käyttö kriittisesti sairaan potilaan tunnistamisessa, opinnäytetyö. Lappeenranta: Saimaan ammattikorkeakoulu, ensihoidon koulutusohjelma. Saatavissa: http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/39631/Jeskanen_Petri_Linnamurto_Lari.pdf?sequence=1. Hakupäivä.11.6.2013.
2. Määttä, Harri 2012. T762803 Painettavan elektroniikan perusteet, 3 op. Opintojakson oppimateriaali syksyllä 2012. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
3. Mäkinen, Jukka-Tapani (toim.) 2010. Painetut hybridisysteemit; Teknologian tila ja kaupallistamisen mahdollisuudet Suomessa. VTT tiedote. Saatavissa: www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2547.pdf. Hakupäivä 26.8.2013
4. Wikipedia 2013. Hemoglobiini. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Hemoglobiini>. Hakupäivä 11.6.2013.
5. Arstila, Antti – Björkqvist, Stig-Eyrik – Hänninen, Osmo – Nienstedt, Walter 1999. Ihmisen fysiologia ja anatomia. Porvoo: WSOY.
6. Harsanyi, Gabor 2000. Sensors in biomedical applications: Fundamental, Technology and Applications. USA: Technomic Publishing Co.
7. Bader, David – Gellerand, Yoav – Goldinov, Leonid – Kugelman, Amir –Mor, Frida – Wasserman, Yoram 2004 .Reflectance pulse oximetry from core body in neonates and infants: comparison to arterial blood oxygen saturation and to transmission pulse oximetry. Saatavissa: www.nature.com/jp/journal/v24/n6/full/7211102a.html. Hakupäivä 11.6.2013
8. Kallioinen, Minna 2012. Lähi-infrapunaspektroskopia (NIRS) aivokudoksen happeutumisen seurannassa. Saatavissa: www.finnanest.fi/files/kallioinen_spektro.pdf. Hakupäivä 10.6.2013.

9. Chan, Edward D. – Chan, Mallory M. – Chan, Michael M. 2013. Pulse oximetry: Understanding its basic principles facilitates appreciation of its limitations. Saatavissa:
www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095461111300053X. Hakupäivä 6.6.2012.
10. Wikipedia 2013. Methemoglobiini. Saatavissa:
fi.wikipedia.org/wiki/Methemoglobiini. Hakupäivä 10.6.2013
11. Siimento, Hannu - Willman, Juha 2011. Hätätilapotilaan tavoittamisviiveen merkitys potilaan hoidon laatuun ja jatkohoitoon. Kajaani: Kajaanin ammattikorkeakoulu, hoitotyön koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Saatavissa:
https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/32763/Siimento_Willman.pdf?sequence=1. Hakupäivä 29.8.2013
12. From olympics to optics. Photonics for a better world: finding answers with NIRS. 2012. SPIE Professional. Saatavissa: spie.org/x84633.xml.
Hakupäivä 26.8.2013
13. Sinnige, Jan 2012. Continuous near-infrared regional cerebral perfusion monitoring shows promise in stroke patients. Saatavissa:
www.medgadget.com/2012/02/continuous-near-infrared-regional-cerebral-perfusion-monitoring-shows-promise-in-stroke-patients.html. Hakupäivä 26.8.2013.
14. Portlite. 2000 – 2013. Artinis Medical Systems B.V. Saatavissa:
www.artinis.com/product/portlite. Hakupäivä 3.9.2013.
15. NIRS. 2000 – 2013. Artinis Medical Systems B.V. Saatavissa:
www.artinis.com/group/NIRS. Hakupäivä 7.6.2013.
16. Sensor labels. Thinfilm. Saatavissa: www.thinfilm.no/products/sensor-labels/. Hakupäivä 26.8.2013.

17. Määttä, Harri 2013. Erikoistutkija, Prinlab. Keskustelu 7.6.2013.
18. Rönkä, Kari 2013. Johtava tutkija ja tuotelinjaveittäjä, VTT: Painetut Hybridisysteemit. Hybridivalmistuksen esittely 22.4.2013.
19. Rönkä, Kari 2013. Johtava tutkija ja tuotelinjaveittäjä, VTT: Painetut Hybridisysteemit. Sähköpostikeskustelu 13.6.2013.
20. Applications - displays. PlasticLogic. Saatavissa: www.plasticlogic.com/applications/displays/ Hakupäivä 26.8.2013.
21. Two digits led seven segment display: Two digits 0.30 inch. 2007 – 2013. SnowDragon Industrial Co. Saatavissa: www.snowdragonledhk.com/new-two-digit-30.htm. Hakupäivä 26.8.2013.

*/*Koodi on tehty Arduino Mega 2560 R2:lle.
Ohjelmalla ohjataan pulssioksimetri-prototyypin ledejä.
Punaiset ja IR-ledit syttyvät vuorotellen 5 sekunnin ajaksi.
Samaan aikaan luetaan anturia ja tulostaan anturin arvo
sarjaporttiin*/*

```
const int SENSOR = 0; //Valitaan analog input -pin anturin lukemiseen
int value=0; // Muuttuja, johon sensorin arvo tallentuu.
int kesto=0; // Luupin kesto
int edluuppi; //Edellisen luupin aloitusaika
```

```
void setup(){
  Serial.begin(9600); //Sarjaportti avataan ja
    //9600 bittiä/s asetetaan tiedonsiirronnopeudeksi.
  pinMode(11, OUTPUT); // Asetaan pin 11 OUTPUT-tilaan.
    //Digital pin 11 ohjataan punaisia ledejä.
  pinMode(13, OUTPUT); // Asetaan pin 13 OUTPUT-tilaan.
    //Digital pin 13 ohjataan IR-ledejä.
}
```

```
void loop(){
  unsigned long kello=millis(); //millisekunteina
  kesto=kello-edluuppi; //

  if(kesto>10000){
    edluuppi=kello; //Jos luuppi on kestänyt yli 10 s,
      // edluuppiin sijoitetaan nykyinen "kellon" aika
  }
}
```

```
do {
  kello=millis();
  kesto=kello-edluuppi;
  digitalWrite(13, HIGH); //IR-led sammutetaan
  digitalWrite(11, LOW); //Punainen led sytytetään
  value=analogRead(SENSOR); //Luetaan anturilta arvo
  Serial.print(kesto); //Tulostetaan aika
  Serial.print("\t");
  Serial.println(value); //Tulostetaan anturin arvo sarjaporttiin
}while(kesto<5000); // IR-ledit palavat 5 s ajan
```

```
do {
  kello=millis();
  kesto=kello-edluuppi;
  digitalWrite(11, HIGH); //Punainen led sammutetaan
  digitalWrite(13, LOW); //IR-led sytytetään
  value=analogRead(SENSOR); //Luetaan anturilta arvo
  Serial.print(kesto); //Tulostetaan aika
  Serial.print("\t");
  Serial.println(value); //Tulostetaan anturin arvo sarjaporttiin
}while(kesto>5000&& kesto <10000); // punaiset ledit palavat 5 s ajan
}
```